

## Platsspecifik snabbbestämning av skördebegränsande markfysikaliska egenskaper

Bo Stenberg<sup>1</sup>, Elisabeth Bölenius<sup>1</sup>, Johan Arvidsson<sup>1</sup> och Gustav Rogstrand<sup>2</sup>

<sup>1</sup>SLU    <sup>2</sup>JTI

### ***Inledning***

Projektet syfte var att möjliggöra rationella markfysikaliska analyser i matjord och alv och därigenom fastställa skördebegränsande faktorer i hela eller i delar av fält. På sikt skulle detta kunna leda till att adekvata åtgärder kan vidtas där de behövs och odlingsinsatser skulle kunna anpassas efter hur skördepotentialen varierar över fält. För detta skulle en sensorutrustning konstrueras som vid färd över fältet samtidigt kan mäta markens penetrationsmotstånd, vattenhalt, jordart och mullhalt.

För att korrekt anpassa odlingsinsatser räcker det inte med att känna till variationer i grödan. Även orsakerna till dessa måste utredas. Inom precisionsodlingen har fokus hittills legat på variationer i matjorden och på leverans av växtnäringsämnen. Detta har dock sällan visat sig kunna förklara annat än en mindre del av skördevariationerna inom fält. Existerande metoder för relevanta markfysikaliska analyser är mycket tidsödande och dyra, därför är nya rationella metoder nödvändiga.

I denna rapport presenteras konstruktionen av sensorutrustningen, projektets genomförande samt de viktigaste resultaten och slutsatserna. Resultaten från projektet resovisas utförligt i två konferensproceedings (Bölenius et al., 2006 och Stenberg et al., 2007) och en rapport (Bölenius et al., 2012). Rapporten från 2012 finns tillgänglig på:

<http://www.slu.se/Global/externwebben/nl-fak/mark-och-miljo/jbhy/dokument/rapport122.pdf>

Dessutom är två manuskript under utarbetande med utgångspunkt i rapporten för internationell publicering.

### ***Konstruktion av penetrometer och NIR-prob för fältanalys***

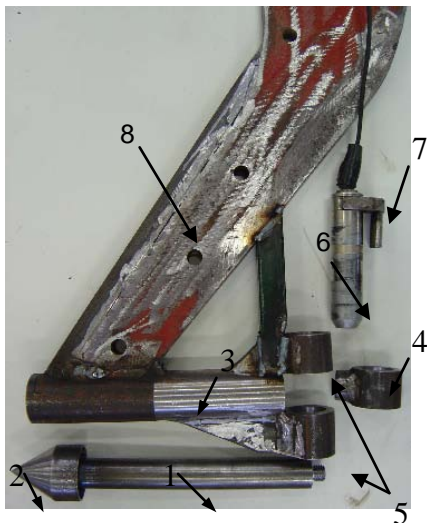
För on-linemätningar i projektet byggdes en penetrometer för horisontell mätning av penetrationsmotståndet i matjord, plogsula och alv. I anslutning till penetrometern konstruerades även en prob för insamlande av NIR (nära infrarött)-spektrum. Material till denna utrustning finansierades av VL-stiftelsen.

Enligt identifierade prestandabehov var målet att den anordning som skulle byggas skulle kunna mäta penetrationsmotståndet på tre djup samtidigt, nämligen 10, 30 och 50 cm. Mätningarna skulle kunna ske vid en överfartshastighet av 5-7 km/h och ge en tillräcklig datamängd för att kunna säkerställa god signalkvallitet genom filtrering. Då anordningen skall användas under fältmässiga förhållanden var det av yttersta vikt att konstruktionen var kraftig nog att klara stenpåkörning och annat slitage utan att mätresultaten äventyrades. För mätning av vattenhalt, mullhalt och textur var det nödvändigt att konstruera en skyddande hållare (prob) åt NIR-optikens fiberkabel och ljuskälla och att proben säkert kunde passera i kontakt med en tillslätad jordyta på 30 cm djup. Läges- och hastighetsbestämning skulle ske med GPS

och alla mätvärden loggas med hjälp av ett DAQ-mätkort och en lap-top. Målet var att driva hela mätsystemet via traktorns 12 V uttag.

### Konstruktion

Som ram och grundkonstruktion till penetrometern, som blivit arbetsnamnet för anordningen, införskaffades en parallellplog av märket Farm Line från 1984. För att mäta penetrationsmotståndet tillverkades koniska billar med en axel som påverkar en kraftgivare. Kraftgivaren var tillverkad av BOSCH Rexroth AG och har en spole som genererar ett symmetriskt magnetfält då den matas med 10 V spänning. Då sensorn belastas med en horisontell kraft förflyttas polerna i förhållande till varandra vilket gör att magnetfältet blir asymmetriskt och genererar en spänningsskillnad i en intilliggande krets där det då uppstår en spänning (2,5 – 7,5 V) som är proportionell till den horisontella kraften. Penetrometern består i korthet av en tryckstång (1) med konisk spets (2) som fritt glider i en hylsa (3) med fettätning och som vid belastning påverkar kraftgivaren (6) (figur 1). Den bakre delen av tryckstången är sammangängad med en kortare vinkelrät hylsa (4) som överför kraften till kraftgivaren. Kraftgivaren, som har formen av en bult har mothåll i över- och underkant med liknande hylsor (5). Kraftgivaren är låst i sitt läge av ett låsstycke (7). Hela konstruktionen är svetsad nedtill på en av parallellplogens plogkroppar (8). Ett tudelat rör är fäst på plogkroppens baksida för att skydda kraftgivarens kabel. Den nedre delen av skyddsroret är fäst med skruvförband för att möjliggöra enkel montering och demontering av kraftgivaren.



Figur 1. Detaljer till horisontell penetrometer. 1-tryckstång, 2-konisk spets, 3-hylsa, 4-kraftöverföringshylsa, 5-mothållshylsor, 6-kraftgivare, 7-låsstycke, 8-plogkropp.

Tre sådana billar tillverkades för djupen 10, 30 och 50 cm. Vid provkörning visade det sig att det var oväntat svårt att få ner billarna på rätt djup. En rad olika metoder provades, exempelvis testades jordsökande vingar som svetsades på plogkroppen. Den slutliga lösningen blev att montera viktstäl och belasta penetrometern med traktorvikter (figur 2).

Parallellplogens befintliga, hydrauliska stenutlösningssystem används i sin ursprungliga utformning för billarna som går på 10 och 30 cm djup. För den djupast gående billen monterades i stället en stel tryckstång och brytbult. Anledningen var att hydraulsystemet inte var stumt vid de moment som uppstår vid normalbelastning på 50 cm djup. Med stenutlösning

och den kraftiga konstruktionen har det visat sig fullt möjligt att använda penetrometern under fältmässiga förhållanden utan att skador uppstår på mätutrustningen vid stenpåkörning.

Då markens hårdhet varierar över fältets olika delar kommer även mätdjupet att variera något eftersom penetrometern temporärt kan pressas uppåt av ett hårdare underliggande lager. För att få information om det aktuella arbetsdjupet, och därigenom möjliggöra filtrering i efterföljande databearbetning, monterades en djupmätare i form av en fritt ledad släpfoot med en potentiometer vars längd påverkas av släpfoten. Potentiometern levererar en spänning (0-10 V) som är proportionell mot potentiometerns längd.



Figur 2. Den färdiga penetrometern med tre billar samt monterade traktorvikter. Den borte billen med aktiverad stenulösare. Till höger under mätning.

En hållare för NIR-proben tillverkades för montering bakom billen som går på 30 cm djup. Hållaren har en kraftig konstruktion för att med säkerhet skydda fiberkabel och elektronik (figur 3). Detta fixeras i hållaren med ett skruvlock och skyddas mot damm och stenskrap av ett safirglas i botten på hållaren. Tanken är att penetrometerbillen skall platta till jorden framför NIR-proben och skapa ett hålrum i marken, ungefär som en tubulerare, för att skapa förutsättningar för god reflektion av den ljusstråle som NIR-sonden sänder ut. Eftersom oväntade problem uppstod med att fånga upp reflekterat ljus genom safirglaset modifierades NIR-proben om så att en separat ljuskälla placeras i vinkel mot NIR-proben, vilket löste brytningsproblemen med safirglaset.



Figur 3. Prob för montering av fiberoptisk kabel och ljuskälla från sidan (v). NIR-prob monterad efter penetrometern (h).

### Kalibrering och signalhantering

Kraftgivarna har kalibrerats mot en PIAB dynamometer med kapacitet att mäta krafter upp till 20 kN vilket i det här fallet motsvarar ett penetrationsmotstånd i marken på 6 MPa.

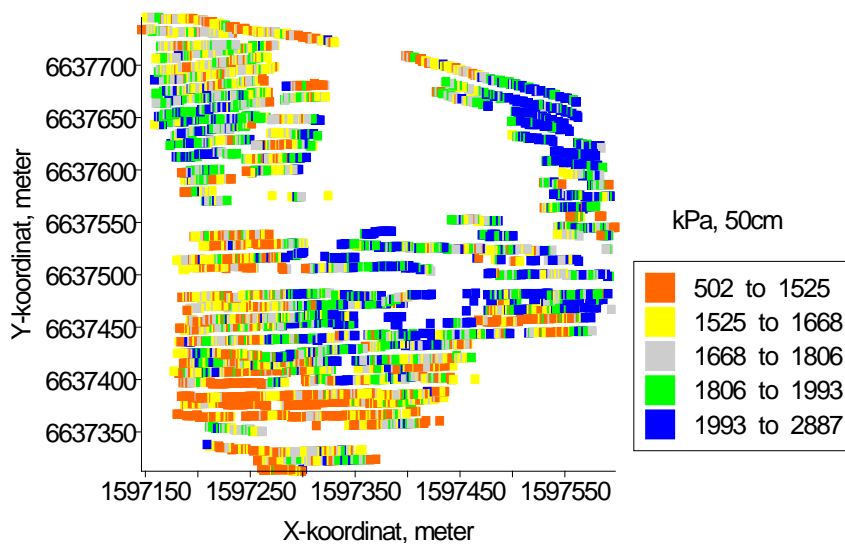
Förhållandet mellan kraften och den utgående spänningen från kraftgivaren var som väntat linjär. Vid kalibrering av utrustningen hade den sämsta kalibreringskurvan ett  $r^2$ -värde på 0,995. Djupmätaren kalibrerades mot en tumstock med gott resultat. Tre upprepningar utfördes och alla genererade linjära samband mellan utspänning och djup med  $r^2$ -värden över 0,999.

Kraftgivarna ger en utspänning i vila på 5 V. Vid belastning genereras en högre eller lägre spänning beroende på om kraften uppstår genom drag eller tryck. Inom arbetsområdet för penetrometern (0-3 MPa) varierar utspänningen från kraftgivarna mellan 5 och 6 V. Datorns mätkort läser av utspänningen från kraftgivaren med en frekvens av 1000 Hz. Denna stora datamängd filtreras ned och ett sekundmedelvärde lagras tillsammans med sekundmedelvärdet från djupmätaren samt geografisk position och hastighet från GPS-enheten. Vid en överfartshastighet på 5 km/h ger således mätsystemet data för penetrationsmotståndet en gång per 1,4 meter.

### Fältmässiga mätningar

Fältmässiga mätningar med penetrometern utfördes i maj och augusti 2004 och 2005. Vid körningen i maj 2004 mättes penetrationsmotståndet på 30 och 50 cm djup i nio längsgående drag med 40 m mellanrum. Majkörningen hade en orienterande karaktär och gav de slutgiltiga svaren om mätsystemets praktiska funktion. Under sommaren uppgraderades konstruktionen med bl.a. djupmätningssystemet och den tredje penetrometerbilen för mätning på 10 cm djup. I augusti utfördes sedan en körning över ett större område. Då mättes penetrationsmotståndet på alla tre djupen i tvärgående drag (vinkelrätt mot dragen från majmätningen) med 10 m mellanrum. Dataupplösningen från augustimätningen blev ca 700 mätpunkter per hektar och djup (se figur 3). Denna datamängd var tillräcklig för att genom filtrering kompensera för variationen i mätdjup utan att äventyra kvaliteten av påföljande interpolation över det mätta områdets hela area. Våren 2005 mättes penetrationsmotståndet på hela fältet, ca 25 ha, med

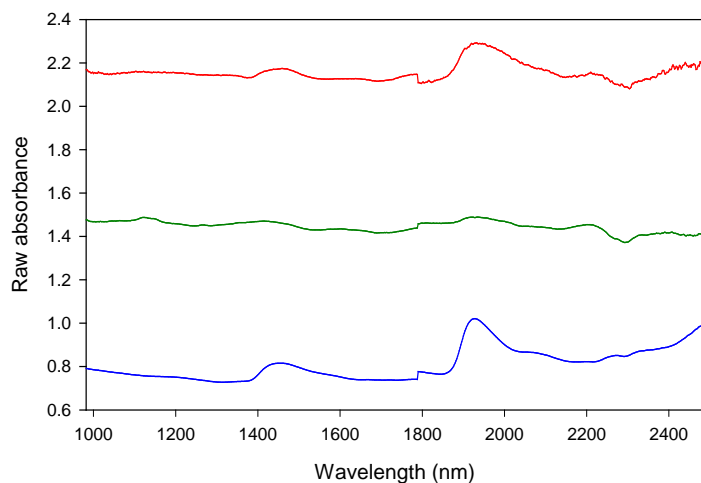
10-20 meters avstånd mellan dragen (figur 5) och samma upplösning gällde för mätningen i augusti det året, dock mättes då ett något mindre område än på våren. Upplösningen vid dessa mätningar tillät även interpolation över hela de mätta områdena.



Figur 3. Exempel på upplösning av data efter filtrering för kompenstation av variation i mätdjup. Penetrationsmotstånd på 50 cm djup.

### NIR-analyser

NIR-proben användes vid mätningarna sensommaren år två. Analys av mätningarna visade på problem med att avståndet mellan safirglaset/proben och den mätta ytan varierade kraftigt vilket resulterade i ett kraftigt brus i mätningarna. Problemet försökte vi lösa med en jordsökande kon på penetrometerspetsen, men detta gav istället osäkra penetrometervärden. En statistisk metod att filtrera bort dåliga spektrum utarbetades och finns beskriven i Stenberg m.fl. (2007). Metoden utnyttjade både brusnivå och form hos spektrumen (figur 4) för att filtrera fram potentiellt användbara spektrum. Hög brusnivå förklarades av dålig kontakt med jorden, dvs. mindre ljus reflekterades, och en annan form hos spektrumen förklarades av ett starkt halminslag. Tyvärr visade sig väldigt få spektrum hålla en tillräckligt hög kvalitet för att det skulle vara meningsfullt att använda dem för kartering. Numera finns en kommersiell lösning med en jordsökande bill för enbart NIR-analys där detta problem är minimerat (Christy, 2008).



Figur 4. Absorbansspektrum ( $\log(1/\text{reflektans})$ ) från on-linemätningar. Nederst ett bra typiskt jordspektrum, överst ett svagt reflekterat och brusigt jordspektrum och i mitten ett oidentifierat spektrum.

## Fältarbete

År ett och två grävdes 20 referensgropar fördelade över ett ca: 10 ha stort område på ett ca: 25 ha stort försöksfält så att en stor del av områdets variation representerades. Groparna var 1 meter djupa och prov togs på var 10:e cm. På dessa analyserades jordart, porositet och genomsläpplighet och vattenhållande förmåga det första året (Tabell 1). Likaså mättes NIR-spektrum stationärt i fält i groparna var tionde cm. Detta utfördes 1 gång per år de två första åren under växtsäsongen. Dessutom togs då även vattenhaltsprover och mängden växttillgängligt vatten beräknades (Figur 6). Två gånger per år mättes även rotdjup i groparna. Våren 2004 mättes elektrisk konduktivitet med EM38 i två körningar över hela fältet (figur 5). En som representerar ett större djup ned till ca 1,5 m med ett maximum runt 75cm och ett grundare med maximum runt 30 cm. Mätningarna gjordes var 10:e meter med ett spår mellanrum på ca: 12 m. Dessutom fanns skördekartor för åren 1994, 1996, 1997, 1998, 1999, 2000 och 2004 tillgängliga för hela fältet (25ha).

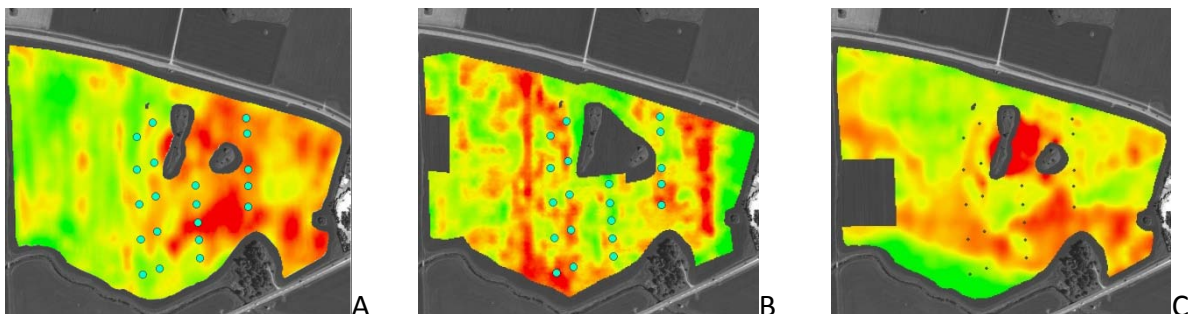
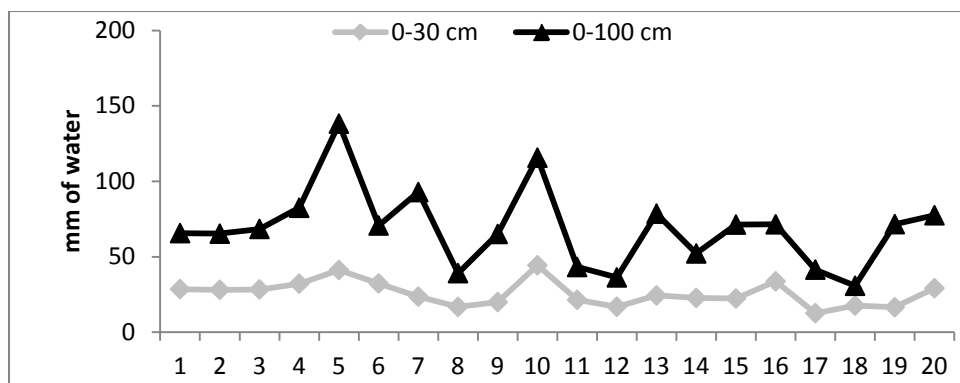


Figure 5. Med *ordinary kriging* interpolerade kartor över A) Skörd (höstvet) 1999, B) Penetrometermotstånd 30 cm vår 2005 och C) grund elektrisk konduktivitet (EM38) 2004. Gröna värden är höga och röda låga. Punkterna representera de 20 provplatserna.

Tabell 1. Samtliga genomförda jordanalyser och fältmätningar

Parameter	Djup	Provtagningsstillfälle
Analyser och mätningar representativa för de 20 groparna		
Kornstorleksfördelning	Fem nivåer ner till en meter	Våren 2004
Organiskt material	Fem nivåer ner till en meter	Våren 2004
Mättad hydraulisk konduktivitet	Fem nivåer ner till en meter	Våren 2004
Skrymdensitet	Fem nivåer ner till en meter	Våren 2004
Vattenhållande förmåga (0,5kPa)	Fem nivåer ner till en meter	Våren 2004
Vattenhållande förmåga (10kPa)	Fem nivåer ner till en meter	Våren 2004
Vissningsgräns (1500kPa)	Fem nivåer ner till en meter	Våren 2004
Kompaktdensitet	Fem nivåer ner till en meter	Våren 2004
Penetrationsmotstånd vertikalt	Ner till 50 cm	Två gånger 2004, en gång 2005
Vattenhalt	Tio nivåer ner till en meter	Fyra gånger 2004, två gånger 2005
Rottillväxt	Ner till en meter	Tre gånger 2004, två gånger 2005
Mätningar utförda on-line över hela fältet		
Penetrationsmotstånd horisontellt	På 30 cm (+ på 50 cm en gång)	Två gånger 2004 och 2005
Elektrisk konduktivitet (EM38)	Grund och djup representation	Våren 2004

Förutom hösten det första året mättes det horisontella penetrationsmotståndet vid två tillfällen år två. Vid den sista mätningen var penetrationsmätaren sammanbyggd med prototypen for NIR-analys i fält (figur 5) och NIR-spektrum samlades då in kontinuerligt från delar av fältet.

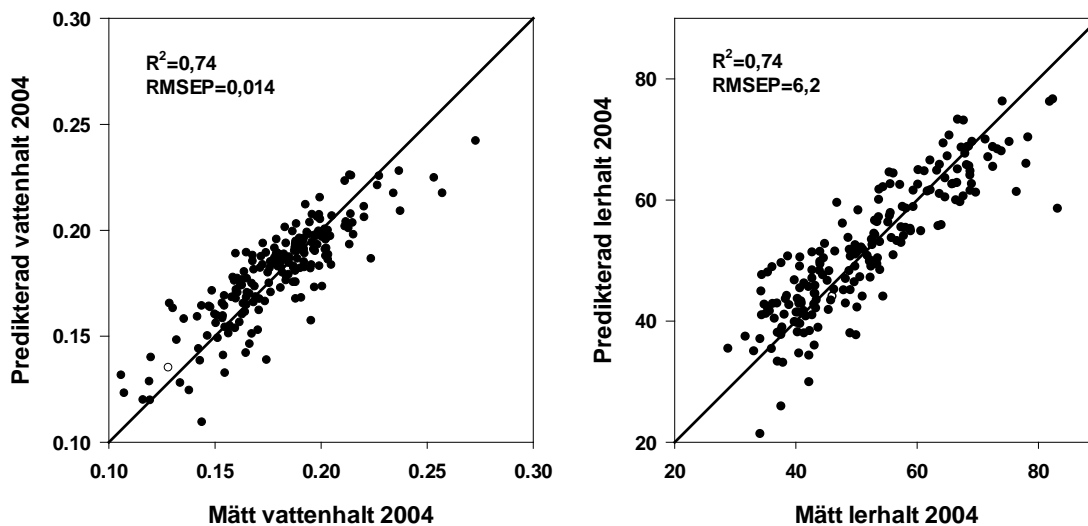


Figur 6. Mängden växttillgängligt vatten i groparna i maj 2004.

## Resultat

Två artiklar i konferensproceedings har publicerats (Bölenius et al., 2006; Stenberg et al. 2007) och två manuskript är under bearbetning. Mer utförligt redovisas nu resultaten över samband mellan markparametrar, penetrationsmotstånd och skördar, dels lokalt vid de 20 provpunkterna, dels över hela fältet, i en nyskriven rapport (Bölenius m.fl., 2012). I Stenberg et al. (2007) tas fasta på de problem som uppstod med högt brus och kontaminering vid NIR-mätningarna on-line och en metod för att sortera ut bra spektrum från de dåliga redovisades.

Utöver detta modellerades vattenhalt och lerhalt utifrån NIR-spektrum mätta på färsk jord under kontrollerade former på profilen i groparna. Resultaten från maj 2004 visas i figur 7. Särskilt lerhalten gav oväntat bra resultat medan vattenhalten är lite sämre predikerat än väntat. Detta kan bero på att den vattenhalt som mättes med NIR på ytan i profilen inte alltid har motsvarat den i det tjockare jordprov som togs för vattenhaltsanalys.



Figur 7. Vattenhalt och lerhalt predikerat från NIR-analyser direkt i de 20 försöksgruparna. Prediktionerna är gjorda genom korsvalidering där en grop i taget predikerats utifrån en kalibrering på de 19 övriga.

## Slutsatser

Nedan följer de viktigaste slutsatserna som finns utförligare redogjorda för i Stenberg m.fl. 2007 och Bölenius m.fl. 2012.

### Penetrometern för on-line mätning

Den konstruerade penetrometern fungerar för fältmässig on-line mätningar av penetrationsmotstånd.

Mätsystemet ger en hög dataupplösning, även efter filtrering, som möjliggör interpolation och framtagande av fältkartor för markpackning.

Penetrometern kräver mycket dragkraft, troligen går den nedre gränsen för dragarens motoreffekt vid 120 hk.



Penetrometerbillarna var oväntat svåra att få ner på rätt djup. Det innebär att man på hårdare jordar, som i det aktuella fallet, måste begränsa sig till ett eller två mätdjup i taget.

Konstruktionen uppfyller i övrigt i stort sett de mål som sattes upp på förhand.

### **NIR-mätningar on-line**

Den praktiska funktionen av en NIR-prob kombinerad med en penetrometer är osäker eftersom säkerställande av kontakt mellan prob och jord är svårt att förena med penetrometers funktion med den lösning vi valt.

Det går att särskilja bra och dåliga NIR-spektrum på ett standardiserat vis med hjälp av matematiska och kemometriska metoder.

### **Samband mellan markparametrar och skörd i gropstudier**

Penetrationsmotstånd var den parameter som hade bäst korrelation med skörd.

Penetrationsmotståndet var också kopplat till jordart, med lägre värden vid ökad lerhalt och mullhalt under fuktiga förhållanden, men inte under torra. Motståndet var alltså starkt kopplat till markens fuktighet, vilket har betydelse vid utvärdering av penetrometervärden som är utförda vid olika tidpunkter på året.

Bland övriga markfysikaliska parametrar var också mängden växttillgängligt vatten vid fältkapacitet och i viss mån porositet/skrymdensitet korrelerat med skörd. Det fanns dock inget samband mellan skörd och mättad ledningsförmåga för vatten.

Det var generellt svaga samband mellan år i skördevariation på fältet. Detta innebär också naturligt att det är svårt att finna starka samband mellan skörd och enskilda parametrar. Samband fick därför studeras årsvis, med relativt goda korrelationer vissa år och svaga korrelationer andra år. Detta gäller även penetrationsmotstånd.

Allmänt tycks sambandet mellan skörd och enskilda markparametrar vara högst under år med låg skördenivå, då det då kan antas att fysikaliska parametrar varit begränsande för skörden.

### **Samband mellan skörd, penetrationsmotstånd och konduktivitet på fältnivå**

Som tidigare nämnts var det ett svagt samband mellan år i skördevariation på fältet, varför korrelationer mellan skörd och markparametrar studerades årsvis. Sambandet mellan skörd och penetrationsmotstånd som erhöles för de enskilda groparna stämde också med resultaten för hela fältet. Enstaka år erhöles en mycket god korrelation mellan skörd och penetrationsmotstånd,  $R^2$  ca 0,65 vilket får betraktas som högt med tanke på den osäkerhet som gäller för enskilda mätvärden. Detta samband gäller skörden 1999 som var relativt låg och året betraktas som mycket torrt. Markens förmåga att hålla växttillgängligt vatten och rötternas förmåga att penetrera profilen blir då avgörande.

En multipel regression där också markens konduktivitet (elektriska ledningsförmåga) ingick höjde korrelationskoefficienten till som bäst ca 0,7. Sambandet mellan skörd och penetrationsförmåga var dock högre än för konduktivitet, vilket är intressant med tanke på att mätning av konduktivitet är en av de vanligaste metoderna för att bestämma markegenskaper

med hög rumslig upplösning. Penetrationsmotstånd och elektrisk konduktivitet relaterar dock till jordart och markstrukturparametrar på ett liknade sätt, om än med omvända tecken. Det verkar alltså som att penetrationsmotståndet ligger närmare det som faktiskt påverkar skörden, dvs. är mer direkt, vissa år.

Mätningarna visar att on-linemätning med en horisontell penetrometer är en intressant metod, för att identifiera områden där markstrukturen kan vara skördebegränsande och förklara skördevariationer på fältnivå, som behöver studeras ytterligare.

## **Referenser**

Bölenius, E., Rogstrand, G., Arvidsson, J., Stenberg, B., Thylen, L. 2006. On-the go measurements of soil penetration resistance on a Swedish Eutric Cambisol. Proceedings of the 17th International Conference of ISTRO, 28 Aug-3 Sep, Kiel, Germany.

Bölenius, E., Stenberg, B., Arvidsson, J., Rogstrand, G., Wetterlind, J. 2012. Platsspecifik snabbbestämning av skördebegränsande markfysikaliska egenskaper. Rapporter från jordbearbetningen, inst. för mark och miljö, SLU. Tillgänglig på länken <http://www.slu.se/Global/externwebben/nl-fak/mark-och-miljo/jbhy/dokument/rapport122.pdf>

Christy, C.D. 2008. Real-time measurement of soil attributes using on-the-go near infrared reflectance spectroscopy. Computers and Electronics in Agriculture, 61(1): 10-19.

Stenberg, B., Rogstrand, G., Bölenius, E., Arvidsson, J., 2007. On-line soil NIR spectroscopy: identification and treatment of spectra influenced by variable probe distance and residue contamination. In: J.V. Stafford (Editor), Precision agriculture '07. Papers presented at the 6th European Conference on Precision Agriculture, Skiathos, Greece, 3-6 June, 2007. Wageningen Academic Publishers, Wageningen, pp. 125-131.